

На правах рукописи

Газизулин Расул Рамилевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКА CsMnF_3 МЕТОДАМИ
МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань – 2013

Работа выполнена в научно-исследовательской лаборатории магнитной радиоспектроскопии и квантовой электроники им. С.А. Альтшулера
ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

- Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,
профессор
Тагиров Мурат Салихович
- Научный консультант:** доктор физико-математических наук,
директор исследований 1-го класса,
Институт Нееля, Франция,
Буньков Юрий Михайлович
- Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник Института
теоретической физики им. Л.Д.Ландау
РАН
Воловик Григорий Ефимович
- доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой физики
молекулярных систем Института физики
КФУ
Скирда Владимир Дмитриевич
- Ведущая организация:** Казанский физико-технический институт
им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН

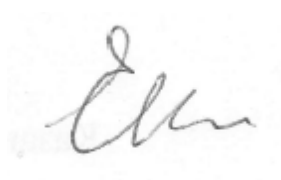
Защита состоится «20» июня 2013 г. в 14 час. 40 мин. на заседании диссертационного совета Д.212.081.15 при Казанском (Приволжском) федеральном университете по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 16а, ауд. 110

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке имени Н.И. Лобачевского Казанского (Приволжского) федерального университета

Автореферат разослан «___» мая 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета:

д.ф.-м.н., профессор



Еремин М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Изучение магнетиков с динамическим сдвигом частоты (ДСЧ) представляет собой общефизический интерес, поскольку сравнительно простая нелинейная система, какой является система ядерных спинов в магнетиках, может быть использована при моделировании ряда нелинейных явлений, в том числе динамического хаоса.

Система ядерных спинов в магнитоупорядоченных веществах, то есть в ферро- и антиферромагнетиках, находится в специфических условиях, отличных от условий в слабомагнитных (диа- и парамагнитных) веществах. Указанная специфика системы ядерных спинов в магнетиках состоит в том, что эти спины взаимодействуют как друг с другом, так и с внешними подсистемами, в том числе с внешним радиочастотным (РЧ) полем, через подсистему магнитоупорядоченных электронных спинов. Свойства последних, тем самым, и определяют целиком всю картину явлений магнитного резонанса в магнетиках [1].

Первые исследования данных систем начались в 60-х годах прошлого века, были рассчитаны спектры ядерных и электронных спиновых волн [2], которые затем были подтверждены экспериментально при исследовании антиферромагнетика KMnF_3 [3]. В этих работах впервые было обращено внимание на нелинейность магнитных явлений в данных системах.

С середины 1970-х годов началось интенсивное изучение антиферромагнитных кристаллов в Институте физических проблем под руководством академика А.С. Боровика-Романова [4]. Эксперименты по ядерному магнитному резонансу (ЯМР) проводились В.А. Тулиным, Б.С. Думшем, Ю.М. Буньковым и В.В. Дмитриевым на монокристаллах MnCO_3 и CsMnF_3 . В этих антиферромагнетиках сверхтонкое поле атомов марганца приводит к сильной поляризации ядер ^{55}Mn ($I = 5/2$, $\gamma_n = 10,5$ МГц/Тл, естественная распространенность 100%), так что их частота

прецессии становится порядка 600 МГц. Эта частота сравнима с частотой низкочастотной линии антиферромагнитного резонанса в малом внешнем магнитном поле. В результате образуются моды связанных ядерно-электронных колебаний, частота которых зависит от величины взаимодействия и от проекции ядерного магнитного момента на ось намагниченности атомов. Сдвиг частоты квази-ЯМР ядер ^{55}Mn может достигать нескольких сотен МГц при температуре порядка 1 К. В результате возникает сильная нелинейность ядерного магнитного резонанса.

Магнитный резонанс в магнетиках нашел широкое применение в радиотехнике. В частности, на основе магнитного резонанса в ферритах удалось создать малошумящие параметрические усилители [1, 5]. Определенный интерес проявляется к возможности непосредственного практического применения магнитного резонанса в магнетиках для создания управляемых линий задержки, анализаторов спектра, устройств оптимальной обработки информации [1, 5]. Большой интерес представляет новая область исследования, получившая название магноники. Основной задачей магноники является использование магнонов в качестве носителя информации на наномасштабе [6, 7]. Благодаря специфическим свойствам спектров спиновых волн магнонные приборы могут обладать такими важными функциональными параметрами, которые в настоящее время недоступны для фотонных и электронных приборов. Например, магнонными приборами легко управлять с помощью внешнего магнитного поля. В то же время магнонные приборы могут быть интегрированы в электронные и фотонные приборы, обеспечивая при этом увеличение быстродействия при одновременном уменьшении геометрических размеров прибора [6].

В 1980 году Ю.М. Буньков обратил внимание на то, что динамические магнитные свойства сверхтекучего ^3He очень похожи на свойства исследовавшихся ранее магнетиков. В сверхтекучем ^3He также наблюдается динамический сдвиг частоты, который зависит от угла отклонения намагниченности ядер. Эта аналогия стала мотивацией изучения

динамических свойств сверхтекучего ^3He в Институте физических проблем, возглавляемым П.Л.Капицей. Эти исследования привели в 1984 году к обнаружению спиновой сверхтекучести и бозе-эйнштейновской конденсации (БЭК) магнонов в сверхтекучем ^3He при сверхнизких температурах [8].

В 2010 году Ю.М. Буньков предложил вернуться к исследованиям магнетиков с ДСЧ с целью обнаружения в них аналогичных эффектов [9]. В частности, динамические свойства ЯМР в сверхтекучем $^3\text{He-A}$ и рассматриваемых магнетиков во многом аналогичны. Поэтому было интересно приложить методики исследования БЭК магнонов в сверхтекучем $^3\text{He-A}$ к исследованию монокристалла CsMnF_3 .

Целью данной работы является применение магнитно-резонансных методик исследования спиновой сверхтекучести и бозе-эйнштейновской конденсации магнонов в сверхтекучем $^3\text{He-A}$ в сжатом аэрогеле к антиферромагнетикам CsMnF_3 в попытке обнаружить подобные явления в данном кристалле.

Научная новизна работы:

1. Впервые проведены экспериментальные исследования устойчивости когерентной прецессии намагниченности в антиферромагнетике CsMnF_3 методами магнитного резонанса.
2. Впервые проведены исследования связанной ядерно-электронной прецессии намагниченности в CsMnF_3 методом квазинепрерывной радиочастотной накачки.
3. Впервые проведены экспериментальные исследования связанной системы ядерных и электронных спинов в CsMnF_3 на предмет возможности формирования бозе-эйнштейновской конденсации магнонов.
4. Предложена методика формирования сигналов бозе-эйнштейновской конденсации магнонов.

Практическая ценность работы

Результаты данных исследований могут быть применены при дальнейших исследованиях магнитных кристаллов с динамическим сдвигом частоты, поскольку большинство полученных экспериментальных закономерностей, скорее всего, являются универсальными. Полученные экспериментальные результаты могут быть так же применены при исследованиях бозе-эйнштейновской конденсации магнонов в твердотельных субстратах, а также при разработке магнонных приборов.

Автор защищает:

1. Результаты экспериментальных исследований антиферромагнетиков CsMnF_3 методами импульсного, квазинепрерывного и непрерывного магнитного резонанса при температуре 1,5 К.
2. Интерпретацию полученных результатов в режиме квазинепрерывной и непрерывной радиочастотной накачки, согласно которой рост амплитуды сигнала ядерно-электронного магнитного резонанса (ЯЭМР) при увеличении сдвига частоты объясняется увеличением угла отклонения намагниченности от направления внешнего магнитного поля.
3. Расчеты углов отклонения намагниченности, позволившие установить, что зависимость амплитуды сигнала от сдвига частоты соответствует условию когерентной прецессии намагниченности – явлению бозе-эйнштейновской конденсации магнонов.
4. Методику накачки магнонов в систему связанных ядерно-электронных спинов в CsMnF_3 , с помощью которой удастся создать условия для формирования БЭК магнонов.
5. Сравнительный анализ результатов по методам магнитного резонанса в сверхтекучем $^3\text{He-A}$ и в антиферромагнетике CsMnF_3 , позволивший выявить общность в динамике их спиновых систем, отклоненных от равновесного состояния.

6. Результаты экспериментальных исследований процессов формирования сигналов ядерно-электронного магнитного резонанса в антиферромагнетике CsMnF_3 .

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на различных международных и университетских конференциях: International Symposium on Quantum Fluids and Solids «QFS2010» (Grenoble, France, 2010), International Conference «Resonances in Condensed Matter» (Казань, 2011), International Youth Scientific School «Actual problems of magnetic resonance and its application» (Казань, 2011, 2012), International Symposium «Spin Waves 2011» (Санкт-Петербург, 2011), The 26th International Conference on Low Temperature Physics (Beijing, China, 2011), на итоговых научных конференциях Казанского (Приволжского) федерального университета (Казань, 2011, 2012).

Публикации

Основное содержание работы отражено в 6 статьях [A1–A6] в реферируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, и 7 тезисах научных конференций [B1–B7].

Личное участие автора в получении научных результатов

Все представленные экспериментальные данные были получены в научно-исследовательской лаборатории магнитной радиоспектроскопии и квантовой электроники им. С.А. Альтшулера Института физики Казанского (Приволжского) федерального университета.

Непосредственно автором были проведены все экспериментальные измерения методами импульсного, непрерывного и квазинепрерывного магнитного резонанса в CsMnF_3 , проведены расчеты углов отклонения намагниченности после коротких (порядка микросекунд) и после длинных

(порядка секунд) импульсов, позволившие установить формирование бозе-эйнштейновской конденсации магнонов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложена на 124 страницах машинописного текста, содержит 62 рисунка и 1 таблицу. Список используемой литературы содержит 87 наименований.

В **первой главе** дается краткий обзор работ по исследованиям бозе-эйнштейновской конденсации магнонов в различных фазах сверхтекучего ^3He . Дается сравнительная характеристика динамических свойств сверхтекучего $^3\text{He-A}$ и антиферромагнетиков с сул-накамуровским взаимодействием.

Бозе-эйнштейновская конденсация – одно из наиболее ярких проявлений макроскопических квантовых явлений. Оно состоит в том, что макроскопическое число частиц формирует когерентное квантовое состояние, описываемое общей волновой функцией. Формирование такого состояния при определенных условиях было предсказано Бозе и Эйнштейном [10].

Строго говоря, теория БЭК применима к устойчивым частицам. Однако она может быть применена и к квазисохраняющимся квазичастицам, если их время жизни существенно длиннее, чем характерные времена формирования бозе-эйнштейновского конденсата. Например, магноны в сверхтекучем ^3He являются квазичастицами, и их БЭК может существовать продолжительное время, и даже поддерживаться непрерывно. В этом случае действием радиочастотного (РЧ) импульса производится накачка неравновесных магнонов в спиновую систему, которые при определенных условиях образуют БЭК. В нормальном состоянии магнитные моменты прецессируют со своими локальными частотами, определяющимися локальными магнитными полями и взаимодействиями. В упорядоченном же состоянии

прецессия всех моментов когерентна: возникает состояние с общей глобальной частотой и глобальной фазой прецессии.

В случае сверхтекучего $^3\text{He-A}$ зависимость частоты когерентной прецессии от угла отклонения β намагниченности от направления внешнего магнитного поля описывается выражением [11]:

$$f = f_L - \frac{F_L^2}{2f_L} \cos \beta, \quad (1)$$

где f_L – ларморовская частота, F_L – леггетовская частота.

В случае магнетиков с ДСЧ частота когерентной ядерно-электронной прецессии имеет аналогичную зависимость от угла отклонения намагниченности от направления внешнего магнитного поля:

$$f = f_{n1} - f_p \frac{m_z}{m_0} \cos \beta = f_{n1} - f_p \cos \beta, \quad (2)$$

где f_{n1} – несмещенная частота ЯМР, f_p – параметр динамического сдвига частоты, m_0 – равновесная ядерная намагниченность, m_z – проекция намагниченности на направление внешнего магнитного поля. Это означает, что спиновые системы в сверхтекучем $^3\text{He-A}$ и в исследуемом антиферромагнетике CsMnF_3 обладают аналогичными (выражения (1) и (2)) динамическими свойствами, удовлетворяющими условиям стабильности когерентной прецессии [9].

Исходя из приведенных теоретических предпосылок, можно ожидать, что свойства БЭК магнонов в CsMnF_3 должны быть схожими со свойствами БЭК магнонов в сверхтекучем $^3\text{He-A}$.

Во **второй главе** описано использованное оригинальное экспериментальное оборудование и представлены экспериментальные результаты по исследованию антиферромагнетика CsMnF_3 методами непрерывной радиочастотной накачки. Все измерения, представленные в данной главе, проводились на монокристалле CsMnF_3 , выращенном С.В. Петровым в Институте физических проблем им. П.Л.Капицы в 70-х годах прошлого столетия.

На рисунке 1 представлены типичные сигналы ядерно-электронного магнитного резонанса при разных мощностях накачки и направлениях развертки магнитного поля.

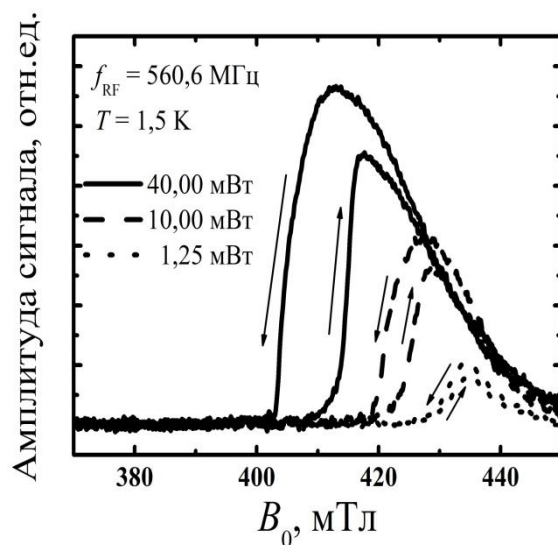


Рисунок 1 – Сигналы ядерно-электронного магнитного резонанса (ЯЭМР) в монокристалле CsMnF_3 при разной мощности РЧ накачки. Стрелки указывают направление развертки магнитного поля, $T = 1,5$ К, $f_{RF} = 560,6$ МГц.

При малой мощности накачки имеет место обычное резонансное поглощение. Кривая поглощения имеет вид изолированного пика в резонансном магнитном поле ~ 435 мТл.

Увеличение мощности РЧ накачки приводит на первом этапе к уширению и смещению в меньшее магнитное поле кривой резонансного поглощения. Дальнейшее увеличение мощности приводит к сильному гистерезису в зависимости от направления развертки магнитного поля, при этом амплитуда сигнала резко увеличивается. Частота сигнала равна частоте накачки при магнитных полях, намного меньших резонансного магнитного поля, а сдвиг частоты РЧ накачки от резонансной частоты в данном поле намного больше ширины линии. Происходит захват частоты ЯЭМР частотой РЧ накачки. Следует отметить важный результат, который заключается в том, что амплитуда сигнала не зависит от мощности накачки.

Предположим, что сдвиг частоты осуществляется за счет отклонения намагниченности от направления внешнего магнитного поля, которое компенсирует расстройку частоты прецессии от резонансной частоты. В этом случае угол отклонения определяется выражением (2), как и в случае с образованием БЭК в сверхтекучем $^3\text{He-A}$:

$$\cos \beta = \frac{f_{n1} - f_{\text{RF}}}{f_p}, \quad (3)$$

где f_{n1} – несмещенная частота ЯМР, f_{RF} – частота РЧ накачки, $f_p = f_{n1} - f_{ne}$ – параметр динамического сдвига частоты, f_{ne} – резонансная частота ЯЭМР.

Соответственно, синус угла отклонения намагниченности будет равен:

$$\sin \beta = \sqrt{1 - \left(\frac{f_{n1} - f_{\text{RF}}}{f_{n1} - f_{ne}} \right)^2}. \quad (4)$$

На рисунке 2 представлены сигналы ЯЭМР в CsMnF_3 и сигналы БЭК магнонов в сверхтекучем $^3\text{He-A}$ [12] в зависимости от магнитного поля при разных мощностях накачки.

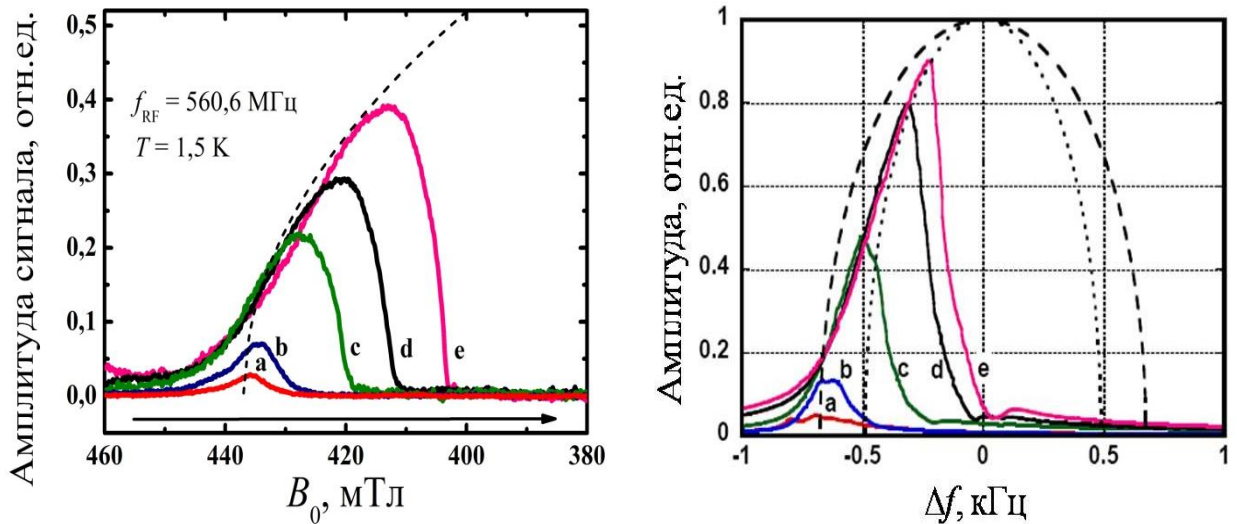


Рисунок 2 – Слева: сигналы ЯЭМР в CsMnF_3 при различных мощностях РЧ накачки (a: 0,32 мВт; b: 1,25 мВт; c: 10 мВт; d: 20 мВт; e: 40 мВт). Справа: сигналы БЭК магнонов в сверхтекучем $^3\text{He-A}$ при различных амплитудах РЧ накачки (a: 0,1 В, b: 0,5 В, c: 1,5 В, d: 3 В, e: 4 В) [12]. Штриховая и пунктирная линии соответствуют когерентной прецессии намагниченности.

Видно, что, так же как и в случае БЭК магнонов в $^3\text{He-A}$ (Рисунок 2, справа), амплитуда сигнала не зависит от мощности накачки, и следует кривой:

$$A = A_0 \sin \beta, \quad (5)$$

что говорит о формировании когерентной прецессии намагниченности.

На рисунке 2 видна полная аналогия наблюдаемых эффектов. В случае CsMnF_3 изменение магнитного поля соответствует сдвигу частоты согласно выражению (2), описывающему условие когерентной прецессии. Соответственно, полученные в CsMnF_3 сигналы можно интерпретировать как образование бозе-эйнштейновской конденсации магнонов.

При малой амплитуде возбуждения виден сигнал линейного ЯЭМР. Ширина линии обусловлена неоднородным уширением, когда условия резонанса выполняются в разном поле для разных спинов. При увеличении амплитуды накачки при уменьшении магнитного поля частота прецессии захватывается РЧ полем. При этом амплитуда сигнала резко увеличивается, что свидетельствует об образовании БЭК магнонов. Подстройка частоты ЯЭМР под частоту РЧ накачки осуществляется за счет изменения числа магнонов, или на языке классической физики за счет увеличения угла отклонения намагниченности от направления внешнего магнитного поля в соответствии с (4).

В третьей главе описано использованное оригинальное экспериментальное оборудование и приводятся результаты экспериментальных исследований двух образцов антиферромагнетика CsMnF_3 методами импульсной и квазинепрерывной радиочастотной накачки. Описывается методика накачки магнонов в систему со связанной ядерно-электронной прецессией, с помощью которой удастся создать условия для формирования БЭК магнонов.

Исследования проводились на двух монокристаллах CsMnF_3 . Первый был выращен в Институте физических проблем им. П.Л. Капицы. На этом же образце ставились эксперименты, результаты которых были приведены во

второй главе. Обозначим его как образец №1. Второй образец монокристалла CsMnF_3 (образец №2) был выращен в Институте геологии и минералогии Сибирского отделения Российской Академии наук в лаборатории Л.И. Исаенко.

На рисунке 3 показана амплитуда сигнала свободной индукции в образце №1 CsMnF_3 как функция длительности импульса при разных значениях внешнего магнитного поля.

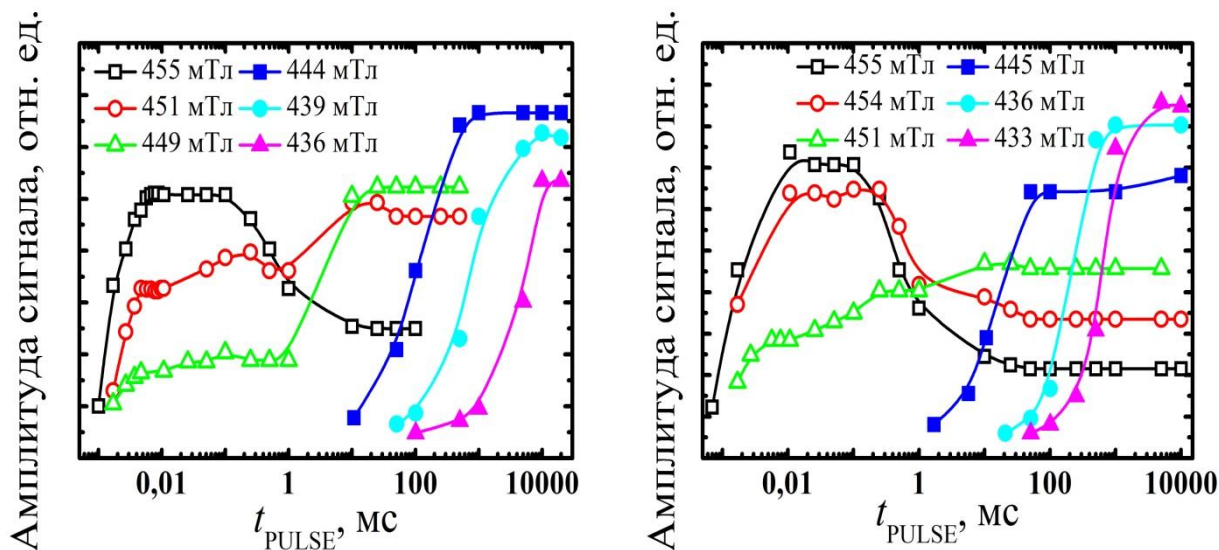


Рисунок 3 – Амплитуда сигнала свободной индукции (ССИ) в образце №1 CsMnF_3 как функция длительности РЧ импульса при различных значениях внешнего магнитного поля (сплошными линиями показан глазовод).

Мощность РЧ импульсов составляла 40 мВт (слева) и 80 мВт (справа),

$$T = 1,5 \text{ К}, f_{\text{RF}} = 566,7 \text{ МГц}.$$

Было обнаружено, что сигнал свободной индукции наблюдается не только при резонансных условиях, когда частота накачки равна или немного отличается от резонансной частоты в данном магнитном поле, но и после РЧ импульсов, частота заполнения которых существенно отличается от резонансной ($f_{\text{RF}} - f_{\text{ne}} \gg \delta f$, где δf – ширина линии).

После коротких импульсов длительностью до $t_{\text{PULSE}} = 0,01$ мс виден ССИ большой амплитуды в магнитном поле около 455 мТл. Это значение магнитного поля соответствует резонансной частоте $\approx 565,8$ МГц при $\beta = 0$.

После подачи импульса частота заполнения сигнала индукции увеличивается до собственной частоты резонатора $\approx 566,7$ МГц. При уменьшении магнитного поля резонансная частота так же уменьшается. Соответственно, амплитуда ССИ после коротких импульсов уменьшается, и сигнал полностью пропадает при $B_0 = 445$ мТл. Тем не менее, сигнал появляется при увеличении длительности РЧ импульса. Например, при уменьшении магнитного поля до 433 мТл, что соответствует резонансной частоте 557,8 МГц (разница частот ≈ 9 МГц, ширина линии ≈ 2 МГц), наблюдался сигнал свободной индукции после достаточно длинного импульса (около 10 с). При этом амплитуда сигнала увеличилась по сравнению с амплитудой при резонансных условиях.

Теория движения магнитных моментов в условиях динамического сдвига частоты при воздействии коротких (до 10 мкс) РЧ импульсов была разработана Е.А. Туровым, М.И. Куркиным и В.В. Николаевым [13]. С помощью этой теории была произведена калибровка амплитуды сигнала свободной индукции после короткого импульса в единицах угла отклонения намагниченности, показавшая, что угол отклонения достигает 10 градусов.

На рисунке 4 показана зависимость амплитуды ССИ после длинного десятисекундного импульса от внешнего магнитного поля. Из рисунка 4 (слева) видно, что амплитуда ССИ практически не зависит от мощности РЧ импульса, и при этом увеличивается при уменьшении магнитного поля от резонансного $B_0 = 457$ мТл. Этот результат аналогичен тем, что были получены при исследованиях методом непрерывной накачки. Полученные результаты так же могут быть объяснены в рамках теории БЭК магнонов. БЭК магнонов в данном случае формируется длительным и интенсивным импульсом, который накачивает магноны, частота которых соответствует частоте накачки f_{RF} . В результате все магноны конденсируются в минимуме энергии во вращающейся системе координат, в которой $f_{ne}(\beta) = f_{RF}$. Очевидно, что чем больше начальная разница частот, тем больше требуется

времени РЧ импульса для накачки достаточного количества магнонов, обеспечивающего необходимый сдвиг частоты.

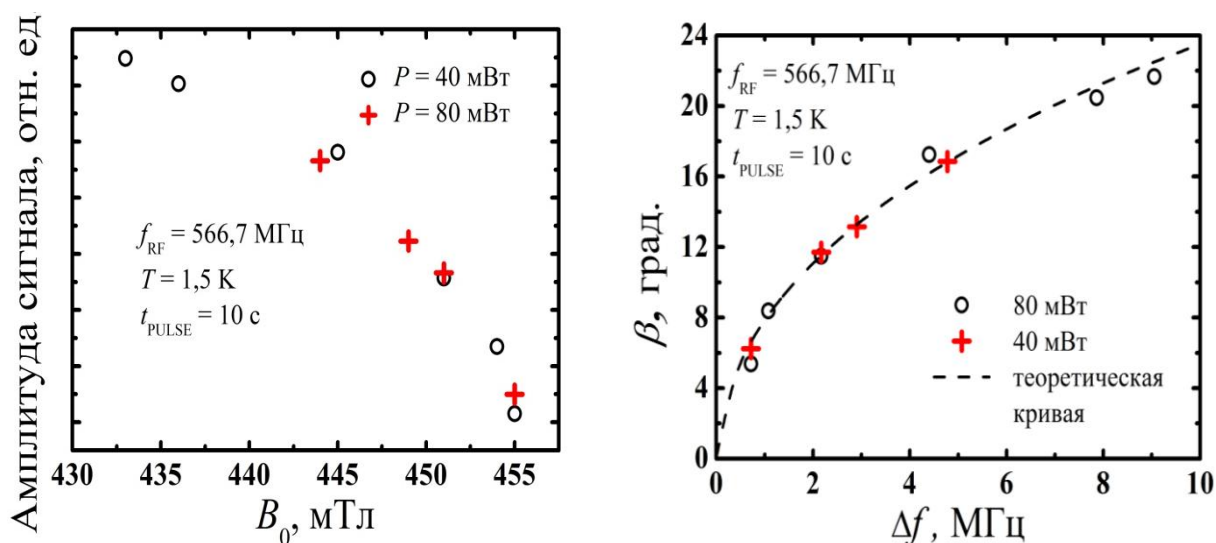


Рисунок 4 – Слева: амплитуда сигнала свободной индукции в образце №1 CsMnF_3 после десятисекундного импульса в зависимости от внешнего магнитного поля. Справа: угол отклонения намагниченности как функция сдвига частоты прецессии от ларморовской частоты. Теоретическая кривая соответствует образованию БЭК магнонов.

На рисунке 4 (справа) амплитуда сигнала индукции прокалибрована в углах отклонения намагниченности в соответствии с теорией образования БЭК. При этом значения магнитного поля пересчитаны в единицах сдвига частоты. Видно, что теоретическая кривая, полученная из расчета по формуле (4), хорошо описывает экспериментальные данные. То есть в данном случае зависимость амплитуды от сдвига частоты точно такая же, как и при непрерывной РЧ накачке. Численные расчеты подтверждают наше предположение о том, что при уменьшении магнитного поля от резонансного поля при достаточно длительной накачке происходит формирование БЭК магнонов, в то время как после коротких импульсов имеет место обычная динамика движения спинов в условиях ДСЧ, когда амплитуда сигнала определяется векторной суммой всех изохромат в пределах ширины линии.

Экспериментальные результаты по исследованию амплитуды сигнала индукции при разных условиях возбуждения, полученные на образце №2 CsMnF_3 , качественно совпадают с данными по образцу №1. На рисунке 5 представлена амплитуда сигнала индукции (в единицах угла отклонения намагниченности) в зависимости от сдвига частоты накачки от резонансной частоты в данном магнитном поле $\Delta f = f_{\text{RF}} - f_{\text{не}}$. Хорошо видно, что эта зависимость в точности повторяет полученную в образце №1. Амплитуда сигнала не зависит от мощности РЧ накачки, а в точности соответствует углам отклонения намагниченности при данной расстройке между линейной резонансной частотой в данном поле и частотой РЧ накачки (4). То есть описывается теми же формулами, которые использовались при описании экспериментальных данных, полученных в образце №1 с помощью непрерывного и квазинепрерывного метода РЧ накачки.

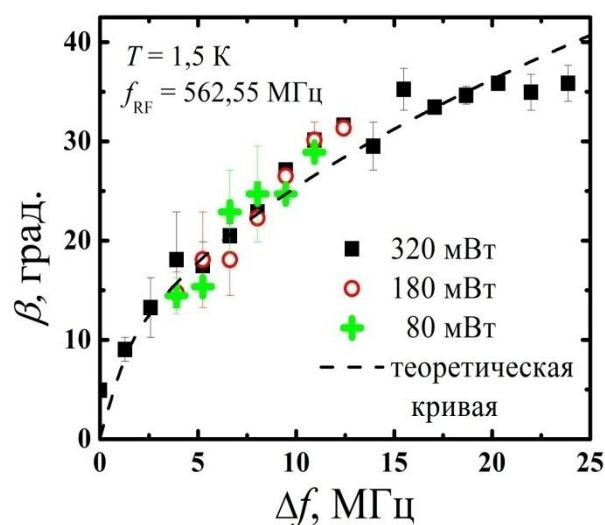


Рисунок 5 – Угол отклонения намагниченности как функция сдвига частоты в образце №2 CsMnF_3 . Теоретическая кривая соответствует условиям образования БЭК магнонов.

Известно, что одним из основных экспериментальных проявлений БЭК магнонов является долгоживущий сигнал индукции. Поэтому интересно было экспериментально проследить не только за амплитудой ССИ, но и за его длительностью. Для сравнения длительностей сигнала индукции выделим два режима РЧ накачки. В первом режиме сигнал индукции наблюдается

после короткого импульса, длительность спада определяется неоднородностью магнитного поля. Экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с теоретическими представлениями о динамике движения магнитных моментов в системах с динамическим сдвигом частоты. Во втором режиме на образец подается достаточно длинный импульс (порядка 1 с), и так же наблюдается сигнал индукции. В этом режиме амплитуда сигнала хорошо описывается в предположении формирования бозе-эйнштейновской конденсации магнонов. Сравнение сигналов в двух режимах представлено на рисунке 6 (слева).

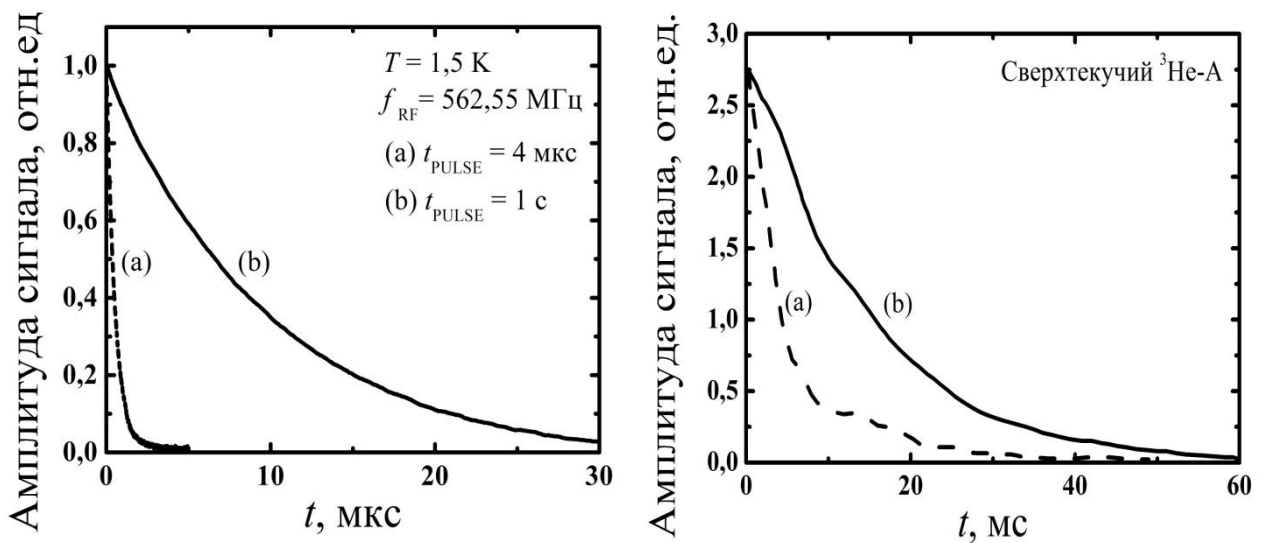


Рисунок 6 – Слева: амплитуда сигнала индукции в двух режимах РЧ накачки в CsMnF_3 (образец №2). Справа: (a) – ССИ в $^3\text{He-A}$ после выключения короткого импульса; (b) – ССИ в $^3\text{He-A}$ после выключения непрерывной накачки (квазинепрерывный ЯМР) [14].

В обоих режимах форма спада описывается экспоненциальной функцией. Время спада составляет 0,53 мкс в линейном режиме и 9,53 мкс в режиме длительной РЧ накачки. То есть в образце №2 CsMnF_3 длительность спада увеличивается более чем на порядок при переходе из одного режима возбуждения в другой, аналогично тому, что наблюдалось в сверхтекучем $^3\text{He-A}$ (Рисунок 6, справа) [14]. Соответственно, исследование длительности спада сигнала индукции так же подтверждает предположение о формировании БЭК магнонов в антиферромагнетике CsMnF_3 .

В четвертой главе описано использованное оригинальное экспериментальное оборудование и приведены результаты экспериментальных исследований процессов формирования сигналов ядерно-электронного магнитного резонанса в двух образцах CsMnF_3 .

На рисунке 7 показано формирование сигнала ЯЭМР после включения РЧ накачки в момент времени $t = 0$ в образце №1 в CsMnF_3 вдали от резонансных условий в магнитном поле 422 мТл. Это соответствует сдвигу частоты около 13 МГц.

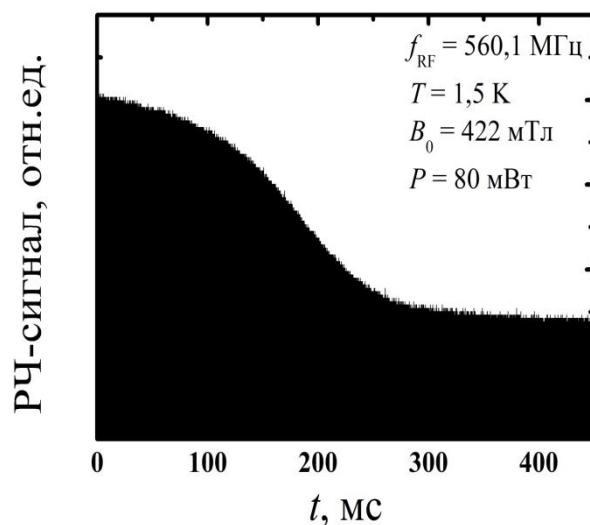


Рисунок 7 – Процесс формирования сигнала ЯЭМР после включения РЧ накачки в момент времени $t = 0$ в образце №1 CsMnF_3 .

Из рисунка 7 видно, что характерное время формирования сигнала составляет порядка 250 мс. Данный временной масштаб гораздо больше любых релаксационных процессов в системе ($T_1 = 1,1 \pm 0,1 \text{ мс}$). При этом он сопоставим с длительностями импульсов, после которых наблюдается излучение БЭК магнонов (Рисунок 3). Соответственно, переходной процесс, изображенный на рисунке 7, можно трактовать как процесс формирования БЭК. Тем самым нам удалось экспериментально зафиксировать процесс накачки когерентных магнонов в систему. На рисунке 8 представлена зависимость времени формирования сигналов ЯЭМР для двух образцов CsMnF_3 от сдвига частоты $\Delta f = f_{\text{RF}} - f_{\text{не}}$.

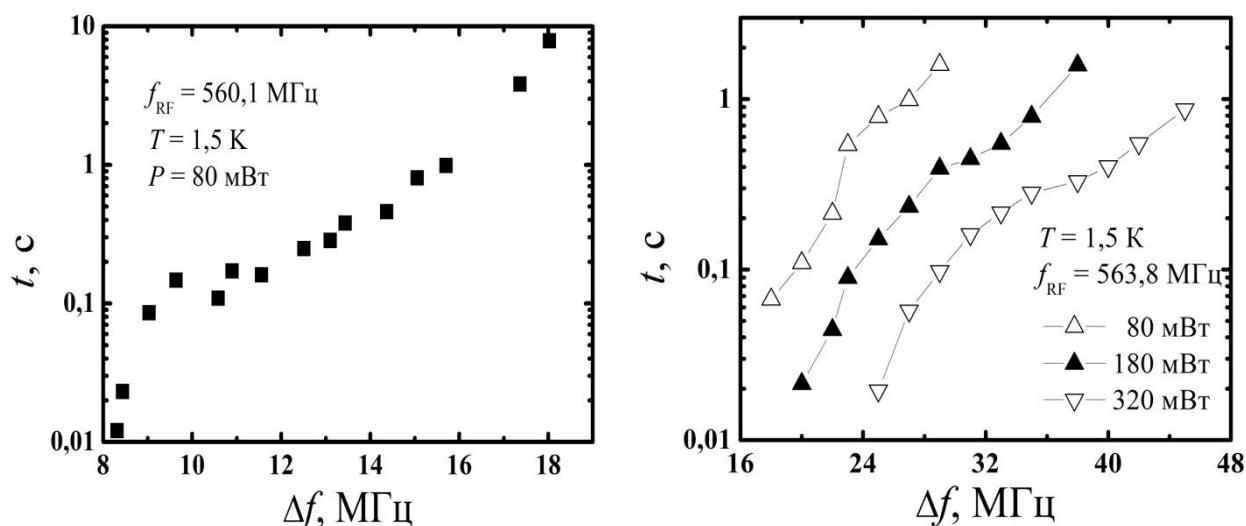


Рисунок 8 – Время формирования сигнала ЯЭМР после включения РЧ накачки в зависимости от сдвига частоты. Слева: образец №1 CsMnF_3 .

Справа: образец №2 CsMnF_3 .

Видно, что это время удлиняется при увеличении сдвига от резонансных условий. Этот результат согласуется с данными по квазинепрерывному методу, когда увеличение сдвига частоты приводило к увеличению времени радиочастотной накачки, требуемого для наблюдения сигнала ядерно-электронного магнитного резонанса.

В заключении приводятся основные результаты работы:

Экспериментально установлено, что при непрерывной и квазинепрерывной радиочастотной накачке при увеличении сдвига частоты происходит устойчивый рост амплитуды сигнала ядерно-электронного магнитного резонанса в CsMnF_3 за счет увеличения угла отклонения намагниченности от направления внешнего магнитного поля. Согласно расчетам, угол отклонения достигает 30 градусов при сдвиге частоты около 24 МГц.

Обнаружено, что экспериментальные результаты, полученные непрерывным и квазинепрерывным методами радиочастотной накачки в CsMnF_3 , могут быть описаны в терминах формирования бозе-эйнштейновской конденсации магнонов. Показано, что этот подход полнее

описывает экспериментальные данные по сравнению с традиционно используемой теорией нелинейного осциллятора, учитывающей перегрев ядерной подсистемы. Основными экспериментальными фактами, подтверждающими данное предположение, являются:

- 1) независимость амплитуды сигнала от мощности радиочастотной накачки;
- 2) характер зависимости амплитуды сигнала от сдвига частоты;
- 3) существенное увеличение длительности сигнала индукции при переходе в режим длительной (порядка 1 с) накачки.

Предложена методика наблюдения сигнала индукции в CsMnF_3 , амплитуда и длительность которого соответствуют бозе-эйнштейновской конденсации магнонов. Согласно этой методике для формирования подобного сигнала необходимо облучить образец длительным (порядка сотен миллисекунд) радиочастотным импульсом при постоянном внешнем магнитном поле. Вопрос о частотном и температурном диапазонах устойчивости такого состояния пока остается открытым.

Экспериментально установлено, что наблюдаемый сдвиг частоты ядерно-электронного магнитного резонанса обусловлен изменением угла отклонения намагниченности.

Публикации автора по теме диссертации

Статьи в ведущих научных журналах, входящих в перечень ВАК:

- A1. Буньков, Ю.М. Обнаружение классической бозе-эйнштейновской конденсации магнонов в твердотельных антиферромагнетиках / Ю.М. Буньков, Е.М. Алакшин, **Р.Р. Газизулин**, А.В. Клочков, В.В. Кузьмин, Т.Р. Сафин, М.С. Тагиров // Письма в ЖЭТФ. – 2011. – т.94. – вып.1. – стр.68-72.
- A2. Bunkov, Yu.M. Magnon Bose-Einstein Condensation in CsMnF_3 and MnCO_3 / Yu.M. Bunkov, E.M. Alakshin, **R.R. Gazizulin**, A.V. Klochkov, V.V. Kuzmin, A.S. Nizamutdinov, T.R. Safin, M.S. Tagirov // Journal of Physics: Conference Series. – 2011. – V.324. – P.012006.
- A3. Bunkov, Yu.M. High- T_c Spin Superfluidity in Antiferromagnets / Yu.M. Bunkov, E.M. Alakshin, **R.R. Gazizulin**, A.V. Klochkov,

- V.V. Kuzmin, V.S. L'vov, M.S. Tagirov // Physical Review Letters. – 2012. – V.108. – P.177002.
- A4. *Bunkov, Yu.M.* Atomic Type Magnon Bose-Einstein Condensation in Antiferromagnet / Yu.M. Bunkov, E.M. Alakshin, **R.R. Gazizulin**, A.V. Klochkov, V.V. Kuzmin, T.R. Safin, M.S. Tagirov // Journal of Physics: Conference Series. – 2012. – V.400. – P.032001.
- A5. *Bunkov, Yu.M.* Erratum: High- T_c Spin Superfluidity in Antiferromagnets / Yu.M. Bunkov, E.M. Alakshin, **R.R. Gazizulin**, A.V. Klochkov, V.V. Kuzmin, V.S. L'vov, M.S. Tagirov // Physical Review Letters. – 2013. – V.110. – P.109901(E).
- A6. *Alakshin, E.M.* Experimental Setup for Observation the Bose-Einstein Condensation of Magnons in Solid Antiferromagnets CsMnF_3 and MnCO_3 / E.M. Alakshin, Yu.M. Bunkov, **R.R. Gazizulin**, A.V. Klochkov, V.V. Kuzmin, R.M. Rakhmatullin, A.M. Sabitova, T.R. Safin, M.S. Tagirov // Applied Magnetic Resonance. – 2013. – V.44. – P.595-603.

Тезисы докладов на научных конференциях:

- B1. *Tagirov, M.S.* The possibility of magnon BEC in antiferromagnetic MnCO_3 / M.S. Tagirov, Yu.M. Bunkov, A.V. Klochkov, and **R.R. Gazizulin** // "QFS2010 International Symposium on Quantum Fluids and Solids" book of abstracts. - Grenoble, France, August 1-7 2010. - p.39.
- B2. *Alakshin, E.M.* Magnon Bose-Einstein condensation, new results /E.M. Alakshin, Yu.M. Bunkov, **R.R. Gazizulin**, A.V. Klochkov, V.V. Kuzmin, A.S. Nizamutdinov, T.R. Safin, M.S. Tagirov // International Conference "Resonances in Condensed Matter", Abstracts, p. 26, Kazan, 21-25 June 2011.
- B3. *Gazizulin R.R.* The observation of magnon BEC in solid antiferromagnet CsMnF_3 / E.M. Alakshin, Yu.M. Bunkov, **R.R. Gazizulin**, A.V. Klochkov, V.V. Kuzmin, T.R. Safin, M.S. Tagirov // XIV International Youth Scientific School "Actual problems of magnetic resonance and its application", Proceedings, pp.17-18, Kazan, 20-25 June 2011.
- B4. *Klochkov, A.V.* The first observation of magnon BEC in solid antiferromagnet CsMnF_3 / A.V. Klochkov, E.M. Alakshin, Yu.M. Bunkov, **R.R. Gazizulin**, V.V. Kuzmin, T.R. Safin, M.S. Tagirov // International Symposium "Spin Waves 2011", Abstracts, p. 21, Saint Petersburg, Russia, June 5-11, 2011.
- B5. *Alakshin, E.M.* Atomic type magnon Bose-Einstein condensation in antiferromagnet / E.M. Alakshin, Yu.M. Bunkov, **R.R. Gazizulin**, A.V.

- Klochkov, V.V. Kuzmin, A.S. Nizamutdinov, T.R. Safin, M.S. Tagirov // The 26th International Conference on Low Temperature Physics, Abstracts, p. 218, Beijing, China, 10-17 August 2011
- B6. *Safin, T.R.* The experimental technique for observing magnon BEC / E.M. Alakshin, Yu.M. Bunkov, **R.R. Gazizulin**, A.V. Klochkov, V.V. Kuzmin, T.R. Safin, M.S. Tagirov // XIV International Youth Scientific School "Actual problems of magnetic resonance and its application", Proceedings, pp.14-16, Kazan, 20-25 June 2011.
- B7. *Gazizulin, R.R.* The magnon Bose-Einstein condensation in single crystal CsMnF_3 / Alakshin E.M., Bunkov Yu.M., **Gazizulin R.R.**, Klochkov A.V., Safiullin K.R., Kuzmin V.V., Rakhmatullin R.M., Sabitova A.M., Safin T.R., Tagirov M.S. // XV International Youth Scientific School "Actual problems of magnetic resonance and its application", Proceedings, pp.48-51, Kazan, 22-26 October 2012.

Цитированная литература

1. *Куркин, М.И., Туров, Е.А.* ЯМР в магнитоупорядоченных веществах и его применения – Москва: Издательство «Наука», 1990. – 248 с.
2. *De Gennes, P.G.* Nuclear Magnetic Resonance Modes in Magnetic Material. I. Theory / P.G. de Gennes, P.A. Pincus, F. Hartmann-Boutron, and J.M. Winter // *Physical Review*. – 1963. – v.129. – N.3. – P.1105-1113.
3. *Witt, G.L.* Nuclear Magnetic Resonance Modes in Magnetic Materials. II. Experiment / G.L. Witt, A.M. Portis // *Physical Review*. – 1964. – v.135. – N.6A. – P.A1616-A1618.
4. *Боровик-Романов, А.С.* Спиновое эхо в системах со связанной ядерно-электронной прецессией / А.С. Боровик-Романов, Ю.М. Буньков, Б.С. Думеш, М.И. Куркин, М.П. Петров, В.П. Чекмарев // *Успехи физических наук*. – 1984. – т.142. – вып.4. – С.537-570.
5. *Туров, Е.А., Петров, М.П.* ЯМР в ферро- и антиферромагнетиках – Москва: Издательство «Наука», 1969. – 260 с.
6. *Kruglyak, V.V.* Magnonics / V.V. Kruglyak, S.O. Demokritov, D. Grundler // *Journal of Physics D; Applied Physics*. – 2010. – V.43. – P.1-14.
7. *Wolf, S.A.* Spintronics: A Spin-Based Electronics Vision for the Future / S.A. Wolf, D.D. Awschalom, R.A. Buhrman, J.M. Daughton, S. von Molnar, M.L. Roukes, A.Y. Chtchelkanova, D.M. Treger // *Science*. – 2001. – V.294. – P.1488-1495.

8. *Borovik-Romanov, A.S.* Long-lived Induction Decay Signal Investigations in ^3He / A.S. Borovik-Romanov, Yu.M. Bunkov, V.V. Dmitriev, Yu.M. Mukharskiy // JETP Letters. – 1984. – V.40. – P.1033-1037.
9. *Буньков, Ю.М.* Спиновая сверхтекучесть и бозе-эйнштейновская конденсация магнонов / Ю.М. Буньков // Успехи физических наук. – 2010. – Т.180. – №8. – С.884-889.
10. *Giorgini, S.* Theory of ultracold atomic Fermi gases / S. Giorgini, L.P. Pitaevskii, and S. Stringari // Reviews of Modern Physics. – 2008. – v.80. – P.1215-1274.
11. *Sato, T.* Coherent Precession of Magnetization in the Superfluid ^3He A-Phase / T. Sato, T. Kunimatsu, K. Izumina, A. Matsubara, M. Kubota, T. Mizusaki, and Yu.M. Bunkov // Phys. Rev. Lett. – 2008. – v.101. – P.055301.
12. *Bunkov, Yu.M.* Magnon BEC in superfluid ^3He -A / Yu.M. Bunkov, G.E. Volovik // JETP Lett. – 2009. – v.89. – P.306-310.
13. *Turov, E.A.* Nuclear Spin Motion with Allowance for Suhl-Nakamura Interaction / E.A. Turov, M.I. Kurkin, V.V. Nikolaev // Soviet Physics JETP. – 1973. – v.37. – P.147-153.
14. *Hunger, P.* Evidence for Magnon BEC in Superfluid ^3He -A / P. Hunger, Yu.M. Bunkov, E. Collin, H. Godfrin // J. of Low Temp. Phys. – 2010. – v.158. – P.129-134.